

# Sistema fibra/rádio com vazão de Gbit/s para aplicações 5G

R. M. Borges, L. A. M. Pereira, T. R. R. Marins, L. L. Mendes, D. H. Spadoti e Arismar Cerqueira S. Jr.

**Resumo**— Este trabalho apresenta a implementação e análise de desempenho de um sistema fibra/rádio para comunicações sem fio de quinta geração (5G). Tal sistema inclui uma rede de distribuição baseada na tecnologia rádio sobre fibra, uma supercélula na banda de 700 MHz, e uma femtocélula na banda de 26 GHz. Pré-distorção digital e equalização foram utilizadas para reduzir o parâmetro de desempenho *error vector magnitude* (EVM), principalmente para 26 GHz. Resultados experimentais demonstram vazão de até 4 Gbit/s e  $EVM_{RMS}$  de 4,6% na femtocélula com área de cobertura de 10 m, destinada a aplicações banda larga de curto alcance.

**Palavras-Chave**— 5G; fotônica de microondas; sistema fibra/rádio.

**Abstract**— This work reports the implementation and a performance analysis of a Gbit/s fiber-wireless system toward 5G. Such system includes a distribution network based on radio over fiber (RoF) technology, a supercell able to cover a high school in a rural area using 700 MHz band and an indoor femtocell with Gbit/s throughput in the 26 GHz band. Digital pre-distortion and equalization were efficiently employed to enhance the performance parameter error vector magnitude (EVM<sub>RMS</sub>), especially at 26 GHz. Experimental results demonstrate 4 Gbit/s throughput and 4.6% EVM<sub>RMS</sub> in the femtocell with 10 m range, aimed for 5G enhanced mobile broadband communications.

**Keywords**— 5G; fiber-wireless system; microwave photonics.

## I. INTRODUÇÃO

A quinta geração de comunicações sem fio (5G) emerge como uma evolução significativa da banda larga móvel, visto que deve suportar ganhos de 1.000 vezes em volume de dados e número de dispositivos conectados em relação à quarta geração (4G) [1]. Além disso, os sistemas 5G devem favorecer um ecossistema aberto para inovação, com novos serviços e aplicações em prol de uma sociedade totalmente conectada. Os principais cenários de uso incluem: banda larga móvel da ordem de Gbit/s (eMBB - *enhanced mobile broadband*); comunicações em massa entre máquinas (mMTC - *massive machine type communications*); comunicações ultra-confiáveis e de baixa latência (URLLC - *ultra-reliable and low latency communications*). Complementarmente, aplicações envolvendo cobertura em áreas rurais e alta mobilidade de usuário, também tem atraído interesse de países de larga extensão, tais como

R. M. Borges, L. A. M. Pereira, T. R. R. Marins, L. L. Mendes e Arismar Cerqueira S. Jr. Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG 37540-000 Brasil (e-mails: ramonmb@inatel.br; luiz.augusto@get.inatel.br; arismar@inatel.br). D. H. Spadoti. UNIFEI, Itajubá, MG 37500-903 Brasil (e-mail: spadoti@unifei.edu.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil. Os autores agradecem o suporte técnico da Keysight em especial ao Eng. Rodrigo Vicentini.

Brasil, China, Rússia e Finlândia [2,3]. Assim, soluções técnicas inovadoras como o projeto do novo rádio 5G (5G NR) e o uso de bandas adicionais do espectro eletromagnético são necessárias para suportar a esperada ampla variedade de serviços [4,5].

Uma das inovações do 5G NR refere-se à técnica de multiplexação utilizada, a qual impacta no espectro do sinal transmitido e, conseqüentemente, na coexistência com outros sistemas de comunicação. Diversas formas de onda baseadas na transmissão de múltiplas portadoras e técnicas de confinamento espectral vêm sendo estudadas nos últimos anos [6–8], incluindo *generalized frequency division multiplexing* (GFDM), que tem sido reconhecida como solução atrativa em termos de emissão fora da faixa e complexidade [9,10]. Recentemente, *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) com prefixo cíclico (CP - *cyclic prefix*) e confinamento espectral, por exemplo OFDM filtrado (F-OFDM), foi especificado pela 3GPP (3rd Generation Partnership Project) para aplicações em sistemas de nova geração [11].

Com relação ao espectro para serviços 5G, considera-se tipicamente ao menos duas bandas distintas [5,12]: banda acima de 6 GHz, com frequências de portadora em torno de 30 GHz e larguras de faixa de até 1 GHz; banda entre 1 e 6 GHz, que inclui as frequências tradicionais dos sistemas celulares, com larguras de faixa de até 200 MHz. Em paralelo, frequências de portadora na faixa de 700 MHz com largura de faixa máxima de 20 MHz constituem uma terceira banda potencial para 5G, destinada a aplicações de longo alcance. Conseqüentemente, tendências em planejamento de rede apontam para redes heterogêneas (HetNet - *heterogeneous networks*), compostas por diferentes tamanhos de células, bem como para redes de acesso de rádio centralizadas (C-RAN - *centralized radio access networks*), nas quais as unidades de rádio e processamento em banda base são conectadas por meio de fibra óptica em enlaces conhecidos como *fronthaul* [13,14].

Neste contexto, sistemas híbridos fibra/rádio baseados na tecnologia de rádio sobre fibra (RoF - *radio over fiber*) vêm sendo propostos para arquiteturas 5G, com o intuito de favorecer a transmissão simultânea de múltiplos sinais de radiofrequência (RF) entre uma estação rádio base centralizada e unidades de antena remotas [15–17]. Tal aplicabilidade permite explorar a infraestrutura óptica existente, bem como sua capilaridade, para criar uma rede banda larga de distribuição de RF. O estado da arte inclui a distribuição de ondas milimétricas e formas de onda potenciais para 5G [18–20], bem como enlaces analógicos de RoF para C-RAN [21,22], assistidos inclusive por processamento digital de sinais [23]. As arquiteturas correlacionadas vêm sendo

implementadas utilizando variadas técnicas e componentes, como por exemplo, modulação direta e externa de laser (LD), moduladores eletroópticos de braço único e de fase e quadratura, fotodetectores do tipo PIN (P-Intrinsic-N) e avalanche. Recentemente, reportamos a integração de um inovador transceptor 5G em uma arquitetura RoF multi-banda baseada em modulador Mach-Zehnder de duplo interferômetro (DD-MZM - *dual-drive Mach-Zehnder modulator*) [24], que foi sequencialmente explorada para implementar um sistema fibra/rádio com vazão na ordem de Gbit/s [25]. O referido sistema foi capaz de prover uma supercélula na banda de 700 MHz e uma femtocélula *indoor* na frequência de 26 GHz, que está incluída em uma das faixas espectrais investigadas para 5G no Brasil [26]. A supercélula permitiu cobertura móvel em área rural, enquanto a femtocélula proveu vazão de 2 Gbit/s e alcance de 7 m, com *error vector magnitude* ( $EVM_{RMS}$ ) igual a 13,8% para sinais com modulação 16-QAM.

O presente trabalho compreende um progresso de [25], visto que reporta uma melhora de desempenho do sistema fibra/rádio proposto. O objetivo é usar pré-distorção digital (DPD - *digital pre-distortion*) e equalização como soluções para reduzir o  $EVM_{RMS}$  obtido na recepção, especialmente em 26 GHz. A principal contribuição em relação ao estado da arte [18–25] refere-se ao emprego conjunto de processamento digital de sinais (DSP - *digital signal processing*) e DD-MZM na implementação do sistema fibra/rádio para aplicações 5G. Contribuições adicionais em relação a [24,25] referem-se à investigação de ordens superiores de modulação e diferentes larguras de faixa, bem como à demonstração de vazão igual a 4 Gbit/s e  $EVM_{RMS}$  de 4,6% na femtocélula com 10 m de alcance.

## II. SISTEMA FIBRA/RÁDIO COM VAZÃO DE GBIT/S

O conceito e o diagrama em blocos do sistema fibra/rádio proposto estão representados na Fig. 1, a qual compreende: geração de sinais de RF; rede de distribuição baseada em RoF;

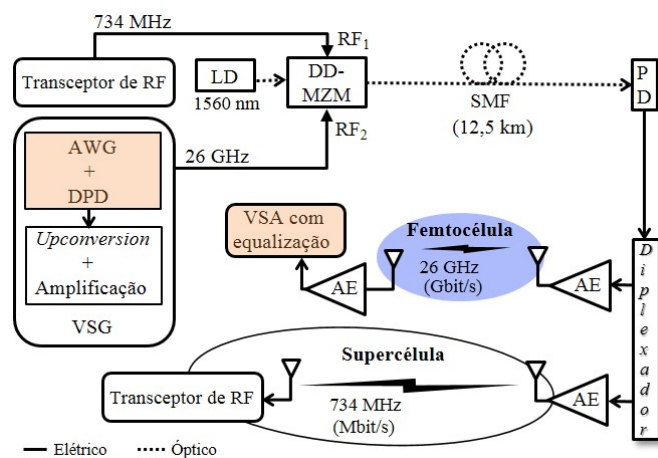


Fig. 1. Diagrama em blocos do sistema fibra/rádio proposto. VSG- *vector signal generator*; AWG- *arbitrary waveform generator*; DPD- *digital pre-distortion*; LD- *laser*; DD-MZM- *dual-drive Mach-Zehnder modulator*; SMF- *single mode fiber*; PD- *photodetector*; AE- *amplificador elétrico*; VSA- *vector signal analyzer*.

unidade remota com fotodetecção, estágios de amplificação e antenas transmissoras; supercélula e femtocélula; antenas e equipamentos de recepção. O diagrama em blocos representa o principal progresso tecnológico em relação a [25], com a finalidade de maximizar a vazão com DPD e equalização na banda de 26 GHz.

Um DD-MZM foi utilizado para modular uma portadora óptica, em 1560 nm, com sinais de RF nas bandas de 700 MHz ( $RF_1$ ) e 26 GHz ( $RF_2$ ). Como tais sinais incidem de forma independente aos braços do DD-MZM, inclusive com tensões de polarização otimizadas para o ponto de quadratura, tem-se a vantagem da redução de interferências oriundas de não-linearidades no processo de modulação óptica [24]. O campo elétrico modulado no domínio óptico é então transmitido em uma rede de distribuição óptica composta por 12,5 km de fibra óptica monomodo (SMF - *single mode fiber*).

Um transceptor de RF desenvolvido com tecnologia nacional e apto a operar com sinais GFDM e F-OFDM na banda de 700 MHz [24] provê  $RF_1$ , que corresponde a um sinal GFDM em 734 MHz. O transceptor em questão conta com a funcionalidade de pré-distorção digital. É importante mencionar que sinais F-OFDM serão explorados em trabalhos futuros, visto que o presente artigo foca em otimizar o desempenho digital do sistema em 26 GHz. Um gerador de sinais vetoriais (VSG - *vector signal generator*) fornece o sinal banda larga em 26 GHz, ou seja,  $RF_2$ . Na atual arquitetura, o VSG inclui geração arbitrária de forma de onda, DPD, estágios de *upconversion* e amplificação de RF.

Sumariamente, DPD é um bloco de processamento que proporciona respostas em fase e amplitude complementares àquelas provenientes de amplificadores elétricos (AE) [27]. Isto significa que o bloco DPD identifica o comportamento de amplificadores elétricos e impõe uma resposta oposta, com o objetivo de reduzir distorções não-lineares introduzidas nos estágios de amplificação. O ajuste dos coeficientes para a DPD pode ser realizado de forma estática ou dinâmica, onde amostras do sinal transmitido realimentam o bloco de processamento. A Fig. 2 ilustra o princípio da DPD ao exemplificar respostas em amplitude de um amplificador e do bloco DPD, assim como a resposta linear resultante.

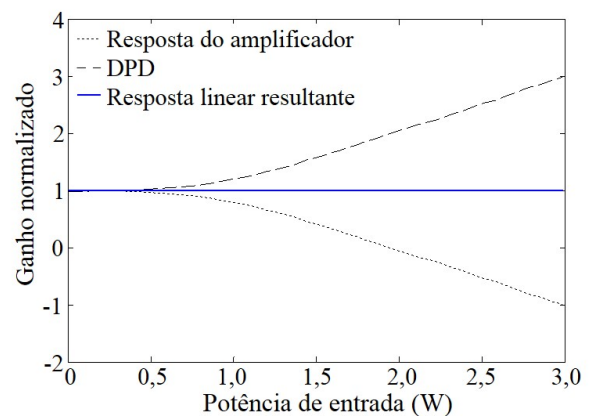


Fig. 2. Princípio da pré-distorção digital.

A rede de distribuição chega à uma unidade remota, onde ambos os sinais de RF são recuperados por um fotodetector (PD - *photodetector*) banda larga e sequencialmente separados por um diplexador. Após estágios de amplificação elétrica,  $RF_1$  e  $RF_2$  são irradiados e recebidos pelas seguintes antenas: Yagi-Uda (na transmissão) e painel (na recepção) com ganho de 9 dBi na banda de 700 MHz; cornetas com ganhos de 25 e 13 dBi na transmissão e recepção, respectivamente, na faixa de 26 GHz. Um segundo transceptor de RF e um analisador de sinais vetoriais (VSA - *vector signal analyzer*) correspondem aos equipamentos de recepção.

O VSA conta com o processo de equalização na corrente topologia. Em resumo, trata-se de um estágio de processamento incorporado ao receptor, com o intuito de mitigar o impacto dos efeitos de canal, como a seletividade em frequência. Tal estágio de processamento introduz, antes da etapa de demodulação, respostas em amplitude e fase opostas àquelas provenientes do meio de propagação. A saída de um equalizador é idealmente uma versão atrasada do sinal transmitido. Um equalizador fixo considera a resposta do canal invariante no tempo, enquanto um equalizador adaptativo ajusta seus coeficientes em função do comportamento dinâmico do canal [27]. A Fig. 3 ilustra o princípio da equalização ao exemplificar respostas em amplitude provenientes de um canal e do equalizador, bem como a resposta equalizada resultante.

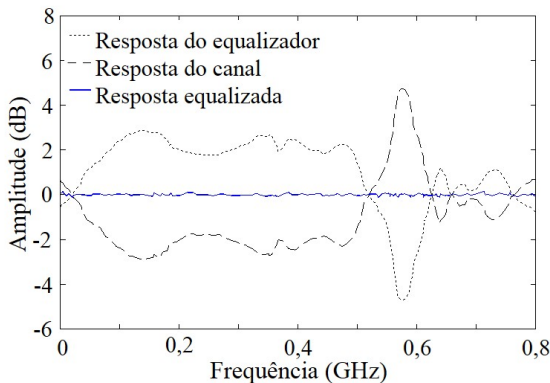


Fig. 3. Princípio da equalização.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema fibra/rádio foi experimentalmente implementado sob as condições de potência apresentadas na Tabela I. Os principais desafios encontrados no projeto foram o balanço de potência para transmissão óptico-*wireless* nas duas bandas espectrais, e a validação da DPD e equalização em 26 GHz utilizando o VSG e o VSA. Particularmente, a supercélula em 734 MHz permitiu vazão de 33 Mbit/s em uma escola na zona rural (a 7,51 km) de Santa Rita do Sapucaí - MG, não atendida por provedores de Internet. A Fig. 4 apresenta o resultado da análise de desempenho digital na recepção. Alcançou-se *modulation error ratio* (MER) de 29,7 dB ao transmitir  $RF_1$  modulado em 256-QAM e com largura de banda igual a 6 MHz [25]. O parâmetro MER foi obtido utilizando uma ferramenta do LabVIEW Communications.

TABELA I  
NÍVEIS DE POTÊNCIA ÓPTICA E ELÉTRICA.

Ponto do setup	Potência
Saída do laser	9,0 dBm
Saída do DD-MZM	4,1 dBm
Saída do transceptor de RF	0,0 dBm
Saída do VSG	2,0 dBm
Entrada do PD	1,0 dBm
Antena transmissora (potência irradiada em 734 MHz)	48,0 dBm
Antena transmissora (potência irradiada em 26 GHz)	17,0 dBm
Entrada do transceptor de RF (a 7,51 km na supercélula)	-55,7 dBm
Entrada do VSG (a 7 m na femtocélula)	-18,3 dBm

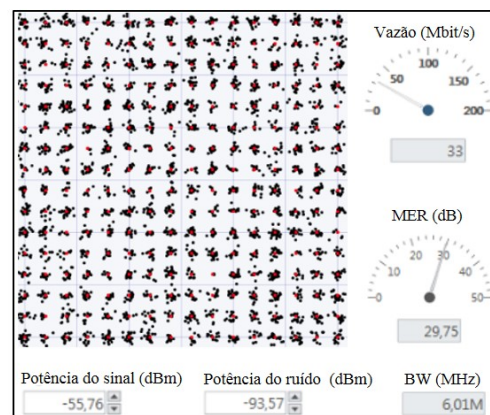


Fig. 4. Análise do sinal GFDM em 734 MHz, a 7,51 km na supercélula.

A análise de desempenho do sinal de 26 GHz, ao usar DPD e equalização, foi inicialmente conduzida em um alcance de 7 m na femtocélula. Para tal, adotou-se modulação 16-QAM, largura de banda igual a 575 MHz, fator *roll-off* de 0,15 e vazão igual a 2 Gbit/s. A Fig. 5 apresenta a constelação, o diagrama de olho, o espectro elétrico e  $EVM_{RMS}$  do sinal recebido. Obteve-se relação sinal-ruído (SNR - *signal-to-noise ratio*) de 25 dB e  $EVM_{RMS}$  igual a 5,0%, que atende com folga ao pré-requisito mínimo especificado pela 3GPP (12,5%) para 16-QAM [28]. É importante mencionar que  $EVM_{RMS} = 5,0\%$  representa uma redução significativa em relação ao  $EVM_{RMS}$  de 13,8% previamente obtido sem DPD e equalização, resultado relatado em [25] sob as mesmas condições.

A melhora no desempenho do sistema fibra/rádio permitiu estender o alcance da femtocélula e explorar ordens mais altas de modulação, assim como outras larguras de banda e taxas de transmissão de dados. A Tabela II reporta os resultados de vazão e  $EVM_{RMS}$  em um alcance de 10 m em ambiente interno. Mantendo 16-QAM e 2,0 Gbit/s, obteve-se  $EVM_{RMS} = 6,4\%$ . Ao utilizar 64-QAM e largura de banda igual a 766,66 MHz, vazão e  $EVM_{RMS}$  atingiram 4,0 Gbit/s e 4,6%, respectivamente. Vazão de 2,6 Gbit/s e  $EVM_{RMS} = 3,8\%$  resultaram da recepção de um sinal 64-QAM com largura de banda de 500 MHz. Adicionalmente, o uso de 256-QAM e largura de banda igual a 115 MHz promoveu vazão de 800 Mbit/s e  $EVM_{RMS} = 3,4\%$  na borda da célula. Todos os



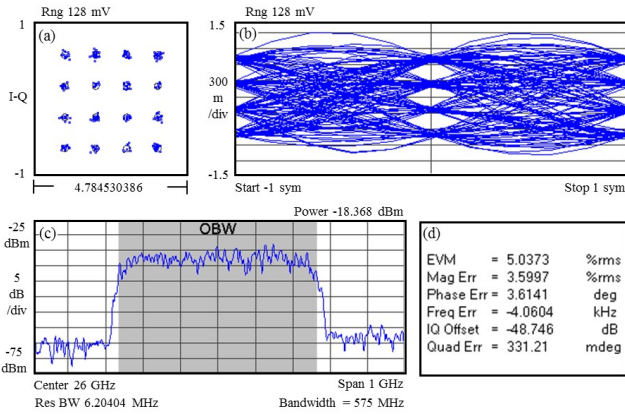


Fig. 5. Análise do sinal em 26 GHz; na femtocélula com 7 m de alcance e vazão de 2 Gbit/s: (a) Constelação; (b) Diagrama de olho; (c) Espectro elétrico; (d)  $EVM_{RMS}$ .

resultados obtidos atenderam às normas da 3GPP em termos de  $EVM_{RMS}$ , os quais foram incluídos na última coluna da Tabela II.

A Fig. 6 apresenta o espectro recebido e a análise de desempenho digital da femtocélula operando em 26 GHz com 64-QAM, largura de banda igual a 766,66 MHz, e vazão duas vezes maior (4 Gbit/s) do que aquela obtida em [25], assim como três vezes superior àquela explorada em [24]. Nota-se SNR de aproximadamente 23 dB, constelação 64-QAM apta a demodulação e  $EVM_{RMS} = 4,6\%$ , o que garantiu comunicação sem fio a 4 Gbit/s com alcance de 10 m em ambiente interno, após distribuição de RF por 12,5 km de rede óptica.

TABELA II

ANÁLISE DE DESEMPENHO DIGITAL NA FEMTOCÉLULA COM 10 M DE ALCANCE.

Ordem da modulação	Largura de banda [MHz]	Vazão [Gbit/s]	$EVM_{RMS}$ [%]	Requerimento de $EVM_{RMS}$ [%] [28]
16-QAM	575	2,0	6,4	12,5
64-QAM	766,66	4,0	4,6	8,0
64-QAM	500	2,6	3,8	8,0
256-QAM	115	0,8	3,4	3,5

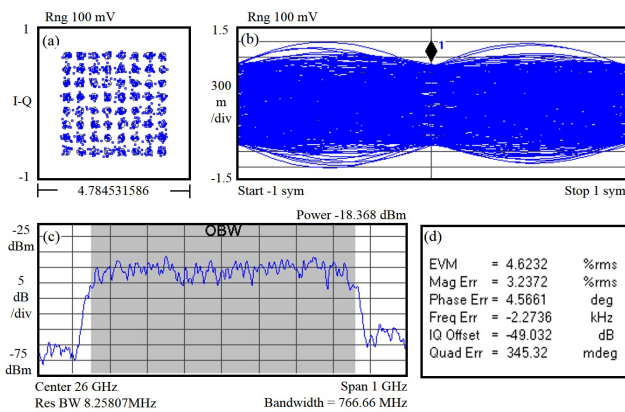


Fig. 6. Análise do sinal em 26 GHz na femtocélula com 10 m de alcance e vazão de 4 Gbit/s: (a) Constelação; (b) Diagrama de olho; (c) Espectro elétrico; (d)  $EVM_{RMS}$ .

## IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a implementação e análise de desempenho de um sistema fibra/rádio com vazão da ordem de Gbit/s para aplicações 5G, incluindo eMBB e cobertura em áreas rurais. Tal sistema permitiu a distribuição de sinais por meio da tecnologia RoF, assim como a implementação de uma supercélula em 734 MHz e uma femtocélula indoor em 26 GHz. O  $EVM_{RMS}$  obtido na femtocélula com vazão de 2 Gbit/s e alcance de 7 m foi reduzido de 13,8% para 5,0% ao implementar DPD e equalização nos equipamentos VSG e VSA, respectivamente. Tal resultado significa uma melhora significativa no desempenho do sistema fibra/rádio, sob mesmo cenário e condições de potência do trabalho prévio [25]. O alcance da femtocélula foi então estendido para 10 m e uma nova análise de desempenho digital foi realizada levando em consideração diferentes larguras de banda e ordens de modulação. Alcançou-se vazão de 4 Gbit/s e  $EVM_{RMS}$  igual a 4,6% na borda da célula ao utilizar 64-QAM e 766,66 MHz de largura de banda. O uso de DPD e equalização em 26 GHz representa, portanto, uma solução chave para favorecer sistemas óptico-wireless de alta vazão em conformidade com as especificações da 3GPP. Trabalhos futuros referem-se ao uso de sinais F-OFDM nas bandas de 700 MHz, 3,5 GHz e 26 GHz.

## REFERÊNCIAS

- [1] 5G PPP, “5G vision,” *White Paper*, Feb. 2015.
- [2] ITU-R, “IMT vision - framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” *Recommendation ITU-R M.2083-0*, Sep. 2015.
- [3] I. Philbeck, “Connecting the unconnected: working together to achieve Connect 2020 Agenda targets,” *ITU White Paper*, 2017.
- [4] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, and R. Tafazolli, “Multi-service system: An enabler of flexible 5G air interface,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 152–159, Oct. 2017.
- [5] ETSI, “5G; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies,” *TR 138 913 V14.2.0 (2017-05)*, 2017.
- [6] Y. Liu, X. Chen, Z. Zhong, B. Ai, D. Miao, Z. Zhao, J. Sun, Y. Teng, and H. Guan, “Waveform design for 5G networks: Analysis and comparison,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19 282–19 292, 2017.
- [7] R. Gerzaguet et al., “The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2017, no. 1, p. 13, Jan. 2017.
- [8] M. Vaezi, Z. Ding, H. V. Poor, Eds., *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*. Cham: Springer, 2019.
- [9] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, “Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, Aug. 2014.
- [10] J. S. Ferreira, H. D. Rodrigues, A. A. Gonzalez, A. Nimr, M. Matthé, D. Zhang, L. L. Mendes, and G. Fettweis, “GFDM Frame Design for 5G Application Scenarios,” *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 54–61, Jul. 2017.
- [11] 3GPP, “5G; Study on new radio (NR) access technology,” TR 38.912 version 15.0.0 Release 15, 2018.
- [12] J. Lee, E. Tejedor, K. Ranta-aho, H. Wang, K. Lee, E. Semaan, E. Mohyeldin, J. Song, C. Bergljung, and S. Jung, “Spectrum for 5G: Global Status, Challenges, and Enabling Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 12–18, Mar. 2018.
- [13] T. E. Bogale and L. B. Le, “Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet: Potential Benefits and Challenges,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 64–75, Mar. 2016.
- [14] C. I. J. Huang, R. Duan, C. Cui, J. Jiang, and L. Li, “Recent progress on C-RAN centralization and cloudification,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1030–1039, 2014.

- [15] G. Kalfas, C. Vagionas, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, A. Mesodiakaki, S. Papaioannou, P. Maniotis, J. S. Vardakas, C. Verikoukis, and N. Pleros, "Next Generation Fiber-Wireless Fronthaul for 5G mmWave Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 3, pp. 138–144, Mar. 2019.
- [16] A. Tzanakaki, M. Anastasopoulos, I. Berberana, D. Syrivelis, P. Flegkas, T. Korakis, D. C. Mur, I. Demirkol, J. Gutierrez, E. Grass, Q. Wei, E. Pateromichelakis, N. Vucic, A. Fehske, M. Grieger, M. Eiselt, J. Bartelt, G. Fettweis, G. Lyberopoulos, E. Theodoropoulou, and D. Simeonidou, "Wireless-optical network convergence: Enabling the 5G architecture to support operational and end-user services," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 184–192, Oct. 2017.
- [17] C. Liu, J. Wang, L. Cheng, M. Zhu, and G. Chang, "Key Microwave-Photonics Technologies for Next-Generation Cloud-Based Radio Access Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3452–3460, Oct. 2014.
- [18] W. Liu, T. Shao, and J. Yao, "Ultra-wideband and 60-ghz generation and transmission over a wavelength division multiplexing-passive optical network," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 9, pp. 1076–1082, Sep. 2013.
- [19] A. Delmade, C. Browning, A. Farhang, N. Marchetti, L. E. Doyle, R. D. Koilpillai, L. P. Barry, and D. Venkitesh, "Performance analysis of analog IF over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 174–182, Mar. 2018.
- [20] M. Bi, W. Jia, L. Li, X. Miao, and W. Hu, "Investigation of f-ofdm in 5g fronthaul networks for seamless carrier-aggregation and asynchronous transmission," in *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Mar. 2017, pp. 1–3.
- [21] C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera, T. A. Nirmalathas, E. Wong, and K. Lee, "Evolution of radio-over-fiber technology," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1647–1656, Mar. 2019.
- [22] N. Argyris, G. Giannoulis, K. Kanta, N. Iliadis, C. Vagionas, S. Papaioannou, G. Kalfas, D. Apostolopoulos, C. Caillaud, H. Debrégeas, N. Pleros, and H. Avramopoulos, "A 5g mmwave fiber-wireless ifof analog mobile fronthaul link with up to 24-gb/s multiband wireless capacity," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 2883–2891, Jun. 2019.
- [23] M. Noweir, Q. Zhou, A. Kwan, R. Valivarathi, M. Helaoui, W. Tittel, and F. M. Ghannouchi, "Digitally linearized radio-over fiber transmitter architecture for cloud radio access network's downlink," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp. 3564–3574, Jul. 2018.
- [24] R. M. Borges, T. R. R. Marins, M. S. B. Cunha, H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, R. N. da Silva, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and Arismar Cerqueira S. Jr., "Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468–4477, Oct. 2018.
- [25] R. M. Borges, T. R. R. Marins, M. S. B. Cunha, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, Arismar Cerqueira S. Jr., "Implementation of a multi-Gbit/s and GFDM-based optical-wireless 5G network," *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 17, no. 4, pp. 579–589, Dec. 2018.
- [26] Anatel, "5G technology and satellites are addressed at Futurecom (in Portuguese)," Nov. 07, 2018. [Online]. Available: <http://www.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2102-tecnologia-5g-e-satelites-sao-abordados-no-futurecom>. [Accessed Apr. 04, 2019].
- [27] D. A. Guimarães, *Digital transmission: A simulation-aided introduction with VisSim/Comm*. London, NY: Springer, 2009.
- [28] 3GPP, "NR; User equipment (UE) radio transmission and reception," TS 38.101-1 version 15.5.0 Release 15, Mar. 2019.